



005055689

На правах рукописи

**Кабанов Артем Анатольевич**

**РАННЯЯ ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК**

01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**22 НОЯ 2012**

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте астрономии Российской академии наук (ИНАСАН)

**Научный руководитель:**

доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН  
ШУСТОВ Борис Михайлович

**Официальные оппоненты:**

ГНЕДИН Юрий Николаевич,  
доктор физико – математических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук

РОМАНЮК Иосиф Иванович,

доктор физико – математических наук, заведующий лабораторией исследований звездного магнетизма Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный Федеральный Университет»

Защита состоится 07 декабря 2012 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.120.01 на базе Главной (Пулковской) астрономической обсерватории Российской академии наук (ГАО РАН) по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, дом 65

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН

Автореферат разослан « 06 » ноября 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Е.В. Милецкий

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Современная Вселенная сложна и полна разнообразных иерархических структур - звезды образуют галактики, галактики - скопления, скопления - сверхскопления. В то же время согласно нашим представлениям ранняя Вселенная была почти однородна. Процесс перехода из такого простого состояния в сложно организованную систему - один из интереснейших этапов ее эволюции. Данный этап связывают с эпохой образования первых звезд (ПЗ) и галактик (ПГ) во Вселенной. Эта далекая эпоха пока еще плохо изучена, и поэтому является предметом повышенного интереса. Одним из важных аспектов эпохи образования первых звезд и галактик является химическая эволюция вещества.

Изучение ранней химической эволюции галактик в настоящее время является одной из наиболее интенсивно развивающихся областей астрофизики (Bromm & Loeb, 2003; Frebel et al., 2005; Tumlinson, 2011). Это связано как с чисто теоретическим интересом, так и с большим объемом наблюдательного материала о галактиках на больших  $z$  (Bouwens et al., 2011) и экстремально низкометаллических звездах (EMPs) - старых звездах, вероятных свидетелях ранней химической эволюции вещества (Beers et al., 1992; Beers et al., 1985; Wisotzki et al., 2000). Кроме того, подробному теоретическому изучению подвергаются первые звезды - звезды, обладавшие большой массой и нулевой металличностью, которые синтезировали первые тяжелые элементы во Вселенной и дали старт химической эволюции вещества (Rollinde et al., 2009; Stacy et al., 2011). По общему мнению, роль первых звезд в начале химической эволюции является определяющей. Именно эти звезды синтезировали первые металлы во Вселенной, и дали возможность

началу формирования маломассивных современных звезд. Однако детали ранней химической эволюции изучены пока мало.

Современные и проектируемые инструменты (в частности, Keck, HST, ALMA, JWST, WSO-UV и др.) позволяют (или позволят) заглянуть в самые ранние эпохи - время, когда происходило образование первых звезд и галактик. С вступлением в строй гигантского 39-метрового телескопа E-ELT ожидается новая ступень в изучении ранней Вселенной.

С точки зрения теории важно найти пути поиска возможных следов существования первых объектов, которые могут быть обнаружены современными приборами. Изучению возможных наблюдательных проявлений первых звезд и галактик в последние годы посвящен ряд работ, причем численное моделирование ранней химической эволюции галактик, включающее в себя этап образования первых звезд, является важным способом, позволяющим уточнить направления поиска и обнаружения следов первых объектов.

Основной подход к изучению ранней химической эволюции - численное моделирование, которое включает процесс формирования галактики, образование звездных населений, их нуклеосинтез, обмен вещества между галактикой и межгалактической средой и ряд других процессов (Кабанов, Шустов, 2011). Таким образом, численное моделирование ранней химической эволюции галактик - важный шаг на пути к пониманию процессов, происходящих на ранних этапах развития Вселенной.

## **Цель диссертации**

При работе над диссертацией были поставлены следующие цели:

- Изменить имеющуюся численную модель химической эволюции галактик, включив в модель современные представления о ранних этапах химического обогащения галактик - образование первых звезд и

их нуклеосинтез. Включить в модель химической эволюции галактик учет тех химических элементов, по которым можно проводить отождествление следов ранней химической эволюции.

- Оценить применимость модели путем численного моделирования истории скорости звездообразования и экстинкции в галактиках на большом красном смещении и сравнения полученных результатов с наблюдениями.
- С помощью разработанной модели исследовать раннюю химическую эволюцию галактик, в том числе изучить влияние различных аспектов звездообразования (закона звездообразования, вида начальной функции масс и т.д.) на химическую эволюцию. Сравнить результаты расчетов ранней химической эволюции галактик с учетом и без учета вклада первых звезд в химическое обогащение вещества.
- Изучить влияние различных моделей звездного нуклеосинтеза на результаты моделирования химической эволюции галактики.

### Научная повизна

В диссертационной работе получены следующие результаты:

1. Построена модель химической эволюции галактик, учитывающая образование звезд населения III и их вклад в химическое обогащение среды. Модель позволяет проводить учет эволюции обилий 9-ти химических элементов - C, N, O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Fe. Также модель учитывает современный иерархический сценарий формирования галактик.
2. Проведено сравнение химической эволюции галактик с учетом и без учета влияния нуклеосинтеза первых звезд. Показано, что для са-

мых ранних этапов химической эволюции учет нуклеосинтеза первых звезд значительно меняет значения обилий химических элементов.

3. С помощью разработанной модели ранней химической эволюции галактик изучено влияние разных параметров, связанных со звездами населения III (диапазон масс ПЗ, способ перехода к современному звездообразованию, значение критической металличности  $Z_{crit}$ , наклон НФМ ПЗ) на химическую эволюцию галактик. Полученные результаты свидетельствуют, что вне зависимости от того, какой параметр звезд населения III варьируется, его влияние на химическую эволюцию галактики быстро исчезает. Поэтому имеет смысл говорить только о влиянии параметров ПЗ на раннюю химическую эволюцию галактики (в пределах первых сотен миллионов лет).
4. Сделана оценка радиуса сферической окрестности Солнца, в которой может находиться хотя бы одна маломассивная звезда ( $M < 0.8M_{\odot}$ ) с дефицитом нечетных элементов (ДНЭ - звезда), т.е. звезда, сохранившая в своем составе отпечаток нуклеосинтеза первых звезд. Расчет сделан в предположении мгновенного и полного перемешивания вещества в галактике и при условии, что эти звезды распределены по диску равномерно.
5. Проведено моделирование эволюции скорости звездообразования и экстинкции в дисковых галактиках на различных  $z$ . Получено хорошее согласие с наблюдаемыми величинами.
6. Проведено сравнение результатов моделирования химической эволюции галактики при использовании разных моделей звездного нуклеосинтеза. Показано, что различия на начальных этапах химической эволюции галактики определяются в основном моделями нуклеосинтеза массивных звезд, так как в этот период велик темп вспышек сверхновых типа II, однако различия исчезают (замываются) при воз-

расте галактики  $t > 10^9$  лет, ввиду того, что в это время уже начинают преобладать выбросы от маломассивных звезд. Поэтому при рассмотрении современной химической эволюции различиями в моделях звездного нуклеосинтеза можно пренебречь.

Ряд результатов (гл.2,3,4,6) получен впервые.

### **Практическая и научная значимость**

Основные результаты данной диссертации, определяющие ее практическую и научную значимость, опубликованы в авторитетных научных изданиях. Наиболее существенные результаты диссертации могут использоваться при развитии теории образования и ранней эволюции первых звезд и галактик. Так, например, полученные в данной диссертации оценки числа звезд с дефицитом нечетных элементов в окрестности Солнца могут быть полезны при планировании программ детального изучения звездного населения с помощью крупных телескопов ближайшего будущего. Программа для изучения ранней химической эволюции галактик является удобным инструментом, который может найти применение при решении широкого круга астрономических задач.

### **Апробация результатов**

Результаты, представленные в диссертации, были неоднократно доложены на конкурсе молодых ученых ИНАСАН (2009, 2010), семинаре ИНАСАН (2011), студенческих конференциях "Физика Космоса" (2011, 2012), конференции "Астрономия в эпоху информационного взрыва: результаты и проблемы", Москва, 2012; а также на международных конференциях - "Dynamics and evolution of disk galaxies", Moscow-Pushchino, 2010; JENAM - 2011, Saint-Petersburg, "Математическая физика и ее приложения", Самара, 2012.

## Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Число страниц в диссертации – 110, рисунков – 28, таблиц – 9, наименований в списке литературы: 122.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

**Во введении** обсуждается актуальность темы диссертационной работы, описываются цели, поставленные при ее написании, формулируется постановка задачи, предмет и метод исследования, обсуждается научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Дается обзор общей картины ранней химической эволюции, процессов формирования первых звезд и галактик, современного состояния изучения ранней химической эволюции и наблюдений максимально далеких галактик и низкометаллических звезд. Также приводится краткий обзор содержания диссертации.

В **Главе 1** "*Модель химической эволюции галактик*" дано описание используемой численной модели для изучения ранней химической эволюции галактик. За основу была взята хорошо зарекомендовавшая себя модель химической эволюции галактики, в которую автор включил учет процессов ранней химической эволюции. В главе 1 описаны все сделанные в модели изменения.

В **параграфе 1.1** "*Основные уравнения модели*" приведены основные уравнения, управляющие эволюцией галактики: уравнение химической эволюции, уравнения для звездного населения галактики (время жизни звезд, масса звездного остатка). В п.1.1.1 описан включенный в модель иерархический сценарий формирования галактики.



В параграфе 1.2 "Механизм учета первых звезд" описан механизм учета образования и эволюции первых звезд при расчете химической эволюции галактик.

В параграфе 1.3 "Зависимость начальной функции масс звезд от металличности вещества" приводится информация о свойствах используемых в модели начальных функций масс первых звезд, о функции масс современных звезд и способе перехода от НФМ первых звезд к современной функции масс.

В параграфе 1.4 "Критическая металличность" дается представление о критической металличности. Показано, как выбирается этот параметр модели.

В параграфе 1.5 "Максимальная и минимальная массы звезд" дан краткий обзор оценок предлагаемых масс звезд населения III и описано, как максимальная и минимальная массы вновь образующихся звезд зависят от металличности вещества.

В Главе 2 "Влияние звезд населения III на раннюю химическую эволюцию галактик" исследован вклад первых звезд на раннюю химическую эволюцию галактики. Для этого проведено моделирование химической эволюции галактики при разных параметрах первых звезд: диапазона масс ПЗ, начальной функции масс, критической металличности, и т.д. Сравниваются модели с учетом и без учета вклада первых звезд в химическую эволюцию галактики.

В параграфе 2.1 "Химическое обогащение МЗС первыми звездами" дано описание самых ранних этапов химической эволюции Вселенной - от момента возникновения первых звезд и последующего образования галактик до взрывов ПЗ и начала обогащения газа продуктами звездного нуклеосинтеза. В параграфе описаны свойства ДНЭ - звезд, вероятных свидетелей нуклеосинтеза первых звезд.

В параграфе 2.2 "Влияние параметров звезд населения III на раннюю

*химическую эволюцию*" приведены результаты моделирования химической эволюции галактик при использовании разных параметров первых звезд. Сделан анализ полученных результатов.

В параграфе 2.3 *"Вероятность обнаружения звезд с пекuliarным составом в окрестности Солнца"* рассчитан радиус сферической окрестности Солнца, в которой может находиться хотя бы одна маломассивная звезда, содержащая химический след эпохи первых звезд (ДНЭ - звезда), сделаны оценки возможности наблюдения.

В Главе 3 *"Влияние параметров нуклеосинтеза звезд на моделирование химической эволюции галактик"* исследовано, как использование разных моделей нуклеосинтеза звезд может повлиять на результаты моделирования химической эволюции галактик.

В параграфе 3.1 *"Обзор моделей нуклеосинтеза"* дан обзор основных существующих моделей нуклеосинтеза для массивных звезд и звезд промежуточных масс. Показаны имеющиеся расхождения между моделями.

В параграфе 3.2 *"Результаты моделирования"* даны результаты моделирования химической эволюции галактики с разными моделями нуклеосинтеза звезд. Показано, что различия на начальных этапах химической эволюции галактики определяются в основном моделями нуклеосинтеза массивных звезд, однако различия исчезают (замываются) при  $t > 10^9$  лет, поэтому при рассмотрении современной химической эволюции различиями в моделях нуклеосинтеза можно пренебречь.

В Главе 4 *"Эволюция скорости звездообразования и экстинкции в дисковых галактиках"* изучена эволюция скорости звездообразования и экстинкции в галактиках различных масс и проведено сравнение с наблюдательными оценками данных величин.

В параграфе 4.1 *"Соотношение масса-радиус"* обсуждается наблюдаемая корреляция "масса-радиус" для дисковых галактик. Сделан обзор литературы по данному вопросу. Выбрана наиболее удачная, по мнению авто-

ров, аппроксимация данной корреляции. Сделано предположение что корреляция "масса-радиус" является следствием соотношения "масса-угловой момент".

*В параграфе 4.2 "Модификация модели"* описаны сделанные в модели химической эволюции галактик изменения для того, чтобы изучать эволюцию скорости звездообразования и экстинкции не только по времени, но и вдоль радиуса галактики. Описан метод разбиения диска галактики на концентрические зоны.

*В параграфе 4.3 "Выбор начальных параметров модели"* описан выбор значений основных параметров модели галактики - темпа аккреции вещества, размера протогалактического облака, показателя  $\alpha$  в наклоне функции масс звезд.

*В параграфе 4.4 "Скорость звездообразования"* представлены полученные результаты для эволюции скорости звездообразования в галактиках различных масс. Проведено сравнение с наблюдаемыми значениями в галактиках на больших красных смещениях.

*В параграфе 4.5 "Экстинкция"* представлены полученные результаты для эволюции экстинкции в галактиках различных масс. Проведено сравнение с наблюдаемыми значениями в галактиках на больших красных смещениях.

В Заключении суммированы основные результаты работы. Приводятся положения, выносимые на защиту, и список опубликованных по теме диссертации работ.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

На защиту выносятся следующие положения:

1. Построена модель ранней химической эволюции галактик, учитыва-

ющая образование звезд населения III и их вклад в химическое обогащение среды.

2. Проведено сравнение химической эволюции галактик с учетом и без учета влияния нуклеосинтеза первых звезд. Показано, что для самых ранних этапов химической эволюции учет нуклеосинтеза первых звезд значительно меняет значения обилий химических элементов.
3. С помощью разработанной модели изучено влияние разных параметров, связанных со звездами населения III (диапазон масс ПЗ, способ перехода к современному звездообразованию, значение критической металличности  $Z_{crit}$ , наклон НФМ ПЗ), на химическую эволюцию галактик. Полученные результаты свидетельствуют, что вне зависимости от того, какой параметр звезд населения III варьируется, его влияние на химическую эволюцию галактики быстро исчезает. Поэтому имеет смысл говорить только о влиянии параметров ПЗ на раннюю химическую эволюцию галактики (в пределах первых сотен миллионов лет).
4. Сделана оценка радиуса сферической окрестности Солнца, в которой может находиться хотя бы одна маломассивная звезда ( $M < 0.8M_{\odot}$ ) с дефицитом нечетных элементов (население II.0). Расчет сделан в предположении мгновенного и полного перемешивания вещества в галактике и при условии, что эти звезды распределены по диску равномерно.
5. Проведено моделирование эволюции скорости звездообразования и экстинкции в дисковых галактиках на различных  $z$ . Получено хорошее согласие с наблюдаемыми величинами.
6. Проведено сравнение результатов моделирования химической эволюции галактики при использовании разных моделей звездного нукле-

осинтеза. Показано, что различия на начальных этапах химической эволюции галактики определяются в основном моделями нуклеосинтеза массивных звезд, так как в этот период велик темп вспышек сверхновых типа II, однако различия исчезают (замываются) при росте галактики  $t > 10^9$  лет, ввиду того, что в это время уже начинают преобладать выбросы от маломассивных звезд. Поэтому при рассмотрении современной химической эволюции различиями в моделях звездного нуклеосинтеза можно пренебречь.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В совместных работах участие автора в постановке задачи, проведении расчетов и анализе результатов равно с другими соавторами. Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Влияние моделей нуклеосинтеза на химическую эволюцию дисковых галактик / *Кабанов А.А.*, // *Астрономический Журнал*. — 2010. — Т. 87. — С. 539–546.
2. Эволюция скорости звездообразования и экстинкции в дисковых галактиках на больших  $z$  / *Кабанов А.А., Тутуков А.В., Шустов Б.М.*, // *Астрономический Журнал*. — 2011. — Т. 88. — С. 218–227.
3. Влияние звезд населения III на раннюю эволюцию галактик / *Кабанов А.А., Шустов Б.М.*, // *Астрономический Журнал*. — 2011. — Т. 88. — С. 218–227.
4. Первые звезды во Вселенной / *Васильев Е.О., Кабанов А.А., Шустов Б.М., Щекинов Ю.А.*, // Сборник статей РФФИ, Москва: Изд-во ЗАО ИТЦ МОЛНЕТ, 2011—с. 42.

5. Образование первых галактик / *Шустов Б.М., Кабанов А.А.*, // Тр. 41-й Международ. студ. науч. конф. «Физика Космоса», Екатеринбург: Изд-во Урал.ун-та, 2012—с. 200.

### Список литературы

- [1] А.А. Кабанов, Б.М. Шустов, АЖ **88**, 852 (2011).
- [2] Beers T. C., Preston G.W., Shectman S.A., Astron. J., **103**, 1987 (1992).
- [3] Beers T. C., Preston G.W., Shectman S.A., Astron. J., **90**, 2089 (1985).
- [4] R.J. Bouwens et al., Nature, **469**, 504 (2011).
- [5] Bromm V., Loeb A., Nature, **425**, 812 (2003).
- [6] A. Frebel, W. Aoki, N. Christlieb et al., Nature, **434**, 871 (2005).
- [7] Rollinde, E., Vangioni, E., Maurin, D., et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc., **398**, 1782 (2009).
- [8] Stacy, A., Bromm, V., Loeb, A., Monthly Not. Roy. Astron. Soc., **413**, 543 (2011).
- [9] Tumlinson, J., Nature, **472**, 426 (2011).
- [10] Wisotzki, L., Christlieb, N., Bade N. et el., Astron. Astrophys., **358**, 77 (2000).

Подписано в печать: 26.10.2012

Заказ № 7759 Тираж - 110 экз.

Печать трафаретная.

Типография «11-й ФОРМАТ»

ИНН 7726330900

115230, Москва, Варшавское ш., 36

(499) 788-78-56

[www.autoreferat.ru](http://www.autoreferat.ru)